

Berekenen en detailleren van betonconstructies (1)

Tweepaals poer

ir. R. Roijackers, ABT BV, Velp/Delft/Antwerpen
 ir. P. Lagendijk (co-auteur), Aronsohn Constructies raad-
 gevende ingenieurs BV, Rotterdam

Om grote geconcentreerde belastingen over verschillende palen te spreiden, worden poeren toegepast. Een poer zal in het algemeen een gedrongen constructie zijn, waarbij de kracht efficiënt naar de palen wordt afgedragen. In dit artikel wordt de krachtsafdracht van poeren behandeld, in het bijzonder van de meest voorkomende variant, de tweepaals poer. Van deze poer wordt ook een voorbeeldberekening gemaakt. Er zijn diverse poeren die veel gemeen hebben met de standaard tweepaals poer, maar die ook enkele belangrijke verschillen te zien geven zoals de vierpaals poer en de tweepaals poer die is geïntegreerd in een funderingsbalk.

Rekenmodellen

Tweepaals poer

Een poer is vaak een gedrongen constructie, waarvoor de rekenregels van een gedrongen ligger gelden. In de gescheurde fase heeft de belastingsafdracht plaats door middel van een systeem van drukdiagonalen en trekbanden (fig. 1).

De drukdiagonaal maakt een hoek θ met de horizontaal. Hierbij valt op dat de drukdiagonaal niet over de volle hoogte van de poer aanwezig is, maar slechts over de hoogte z . De drukdiagonaal eindigt boven de steunpunten.

Onderin de poer ligt de trekband. De trekkracht wordt opgenomen door de onderwapening, die voldoende verankerd moet zijn om de op te nemen trekkracht te kunnen ontwikkelen.

Evenals bij het dimensioneren op buiging is ook bij de toetsing op dwarskracht de gedrongenheid van belang. De opneembare dwarskracht hangt immers af van de dwarskrachtslankheid en die is bij poeren in het algemeen zo klein dat van een verhoogde opneembare schuifspanning τ_1 mag worden uitgegaan. Deze verhoging is toegestaan als er sprake is van een vrije eindoplegging of, anders gezegd, als er een drukdiagonaal kan ontstaan.

Uit proeven is gebleken dat naarmate een ligger meer gedrongen is, een horizontaal geplaatste dwarskrachtwapening effectiever is dan verticale beugels [1]. Dit is eenvoudig te verklaren uit het feit dat de drukdiagonaal steiler wordt naarmate de gedrongenheid toeneemt.

Drie- en veelpaals poeren

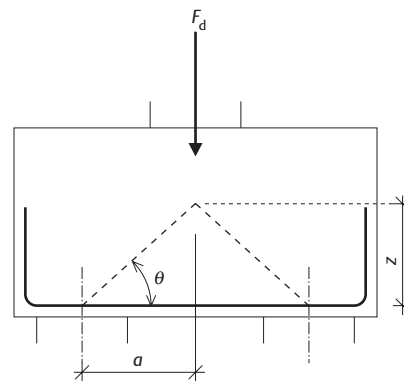
De krachtswerking van een vierpaals poer is iets gecompliceerder dan die van een tweepaals poer. De

berekening is echter meestal terug te brengen tot die van een tweepaals poer.

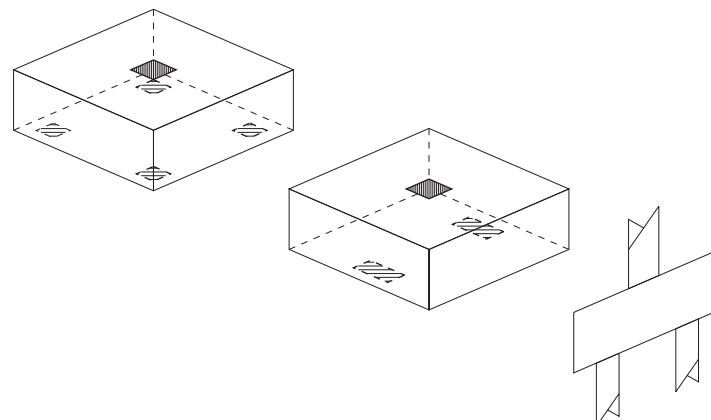
Uitgegaan wordt van een symmetrische vierpaals poer. Bekijk de poer slechts in één richting, bijvoorbeeld de x-richting. Doe voor de berekening alsof de vierpaals poer een tweepaals poer is, maar dan met tweemaal zo dikke palen (fig. 2). De belastingen en de overige afmetingen blijven ongewijzigd. Bereken vervolgens de buigtrekwapening en de dwarskrachtwapening op de normale wijze. De berekende wapening moet in beide richtingen aangebracht worden, ook in de niet bekeken richting!

Bovenstaande rekenmethode [1] is niet de enige methode om een vierpaals poer te berekenen. De vierpaals poer kan ook worden gezien als een driedimensionaal vakwerk waarin schuine drukdiagonalen lopen [2] (fig. 3). Hier kan gebruik worden gemaakt van de vakwerkanalogie (zie *Cement* 1985 nr. 3, Vier-paals poeren).

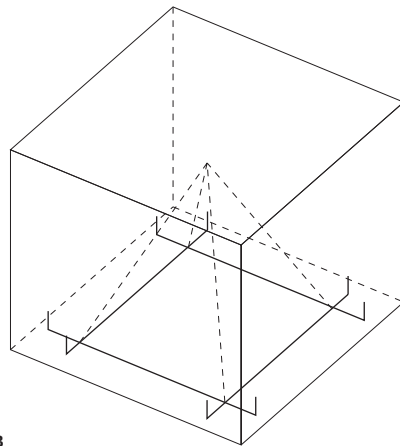
Het berekenen van drie- en veelpaals poeren vergt wat meer inzicht. Hier zal zelf een realistische aanname moeten worden gedaan voor de drukdiagonalen.



Figuur 1



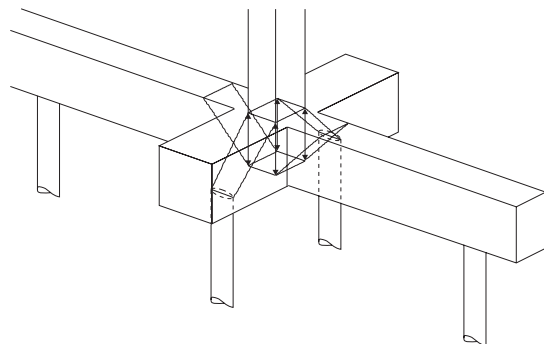
Figuur 2



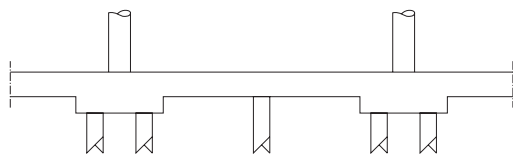
Figuur 3

Tweepaals poer in een betonbalk

Een tweepaals poer kan ook voorkomen in een betonbalk. Als de poer loodrecht op de balk ligt, zal de dwarskracht in de balk ter plaatse van de kruising opgetild moeten worden, om vervolgens in de richting van de poer naar de palen afgedragen te kunnen worden. Voorzover de belasting niet uit de bovenbouw komt, is ophangwapening noodzakelijk. In figuur 4 zijn de drukdiagonalen getekend. Verder is de ophangwapening schematisch met pijltjes aangegeven.



Figuur 4



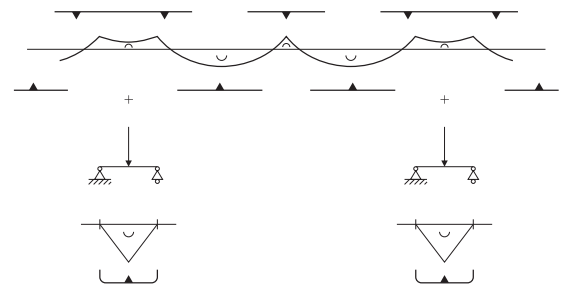
Figuur 5

De poer kan ook in de richting van de balk voorkomen, bijvoorbeeld ter ondersteuning van een kolom (fig. 5). Volgens de rekenregels in de VBC [3] mag niet met verhoogde dwarskracht worden gerekend, er is immers geen vrije eindoplegging. Dit zou betekenen dat er veel dwarskrachtwapening moet worden toegepast. Toch is heel goed voor te stellen dat de belas-

ting uit de kolom via een drukdiagonaal de palen bereikt. In de toelichting bij VBC 8.2.3.1 staat dat wel op een verhoging van de dwarskracht mag worden gerekend, mits de 'verstoring' op de momentenlijn door de aansluitende balken niet bij het berekenen van de trekband van de poer in rekening wordt gebracht.

De balk kan als volgt worden benaderd:

- bereken de momenten en dwarskrachten van de volledige balk, zonder de kolombelasting;
- bereken de bijbehorende wapening in de balk;
- superponeer hierop de wapening in de poer door de kolombelasting; neem hierbij aan dat de poer scharnierend met de rest van de balk is verbonden (fig.6).



Figuur 6

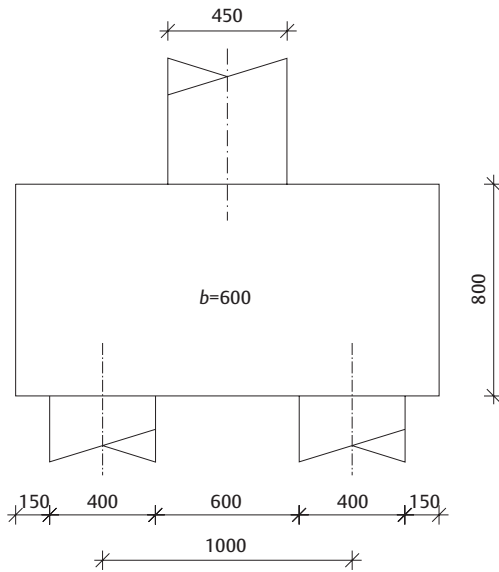
Dimensioneringsregels

Onderstaande aanbevelingen zijn slechts bedoeld als indicatie bij het eerste ontwerp van een poer. De afmetingen zullen altijd in een berekening geverifieerd moeten worden.

- Neem de poerafmetingen niet te klein. Vooral dwarskrachtbeugels in tweepaals poeren leiden tot ingewikkelde en kostbare wapening.
- Neem de afstand van de buitenkant van de paal tot de buitenkant van de poer groter dan 150 mm en meer dan 0,3 x de paalafmeting (uitgaande van vierkante palen). Dit voorkomt in veel gevallen problemen met de verankering van de onderwapening.
- Neem voor de minimale poerbreedte de paalafmeting + 2 x 100 mm.
- Neem voor de maximale poerbreedte 2 x de paalafmeting.
- Neem voor de poerhoogte van tweepaals poeren minimaal 2 x de paalafmeting.
- Kies voor een hoge betonsterkteklasse om beugels zo veel mogelijk te vermijden.

Voorbeeldberekening

Gegevens (fig. 7)



Figuur 7

poer: lengte $l = 1700$ mm
 breedte $b = 600$ mm
 hoogte $h = 800$ mm
 paal: 400×400 mm²
 kolom: 450×450 mm²
 beton: B 25, milieuklasse 2, dekking =
 $30 + 5 = 35$ mm
 staal: FeB 500

belastingen: veiligheidsklasse 3
 $\sum F_g = 1000 \text{ kN} \times 1,2 = 1200 \text{ kN}$
 $\sum F_q = \frac{1000 \text{ kN}}{1,5} = 1500 \text{ kN}$
 $= 2000 \text{ kN}$ 2700 kN

Hoofdbuigwapening

Toetsing gedrongen ligger volgens VBC 8.1.4

$$l_{ov} / h = 1,0 / 0,8 = 1,25 < 2$$

De ligger moet als gedrongen worden beschouwd.

$$\begin{aligned} z &= 0,2 l + 0,4 h \geq 0,6 l \\ &= 0,2 \cdot 1000 + 0,4 \cdot 800 \geq 0,6 \cdot 1000 \\ &= 520 \geq 600 \\ &= 520 \text{ mm (fig. 8)} \end{aligned}$$

Wapening

$F_d = 2700$ kN (fig. 9)

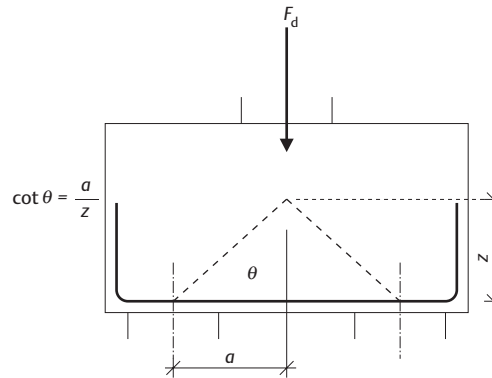
$R_d = V_d = 1350$ kN

$M_d = \frac{1}{4} \cdot 2700 \cdot 1,0 = 675$ kNm

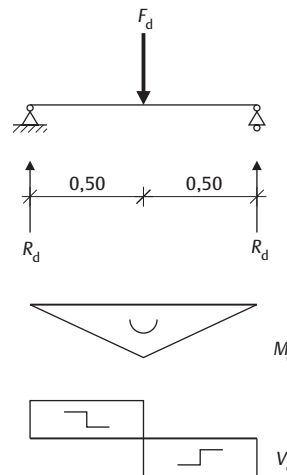
$A_{s,ben} = M_d / f_s z = 675 \cdot 10^6 / 435 \cdot 520 = 2984$ mm²

Kies 7 Ø25 = 3430 mm²

($A_{min} = 0,15 \cdot 600 \cdot 800 / 100 = 720$ mm² < 3430 mm²)



Figuur 8



Figuur 9

Toetsing scheurvorming volgens VBC 8.7.2

$$\sigma_{km} \leq \frac{k_1 \xi}{\sigma_s} \quad \text{of} \quad s \leq 100 \left[\frac{k_2 \xi}{\sigma_s} - 1,3 \right]$$

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{F_{rep}}{F_d} \cdot \frac{A_{s,ben}}{A_{s,aanw}} \cdot 435 \\ &= \frac{2000}{2700} \cdot \frac{2984}{3430} \cdot 435 = 280 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\sigma_{km} \leq \frac{3750 \cdot 1}{280} = 13,4 \quad \text{of} \quad s \leq 100 \left[\frac{750 \cdot 1}{280} - 1,3 \right] = 138$$

$$\sigma_{km} = 25 > 13,4 \quad \text{en} \quad s = \frac{600}{7} = 86 < 138$$

De gekozen wapening voldoet aan de tweede van de twee voorwaarden. Bij de poer zal dit bijna altijd zo zijn vanwege de grote staafdiameter, het hoge aantal staven en de beperkte breedte.

Verankering van de hoofdwapening volgens VBC 9.6

Bij de bepaling van de verankeringslengte moet volgens artikel 9.6.1 rekening worden gehouden met de verschuiving van de momentenlijn, die volgens artikel 8.1 bij puntvormige ondersteuning tot het hart van de oplegging moet reiken. In het onderhavige geval houdt dit in dat boven het hart van de paal met het maximale buigend moment rekening moet worden gehouden. Dit wordt ook wel een volledige trekbandverankering genoemd en die zal bij de meeste poeren van toepassing zijn.

$$\varnothing_k = 25 \text{ mm: } l_v = l_{v0}$$

$$l_{v0} = \alpha_1 \varnothing_k \frac{f}{\sqrt{f'_b}}$$

$$\alpha_1 = 0,40 \left[1 - 0,1 \frac{c}{\varnothing_k} \right] \leq 0,24$$

$$= 0,40 \left[1 - 0,1 \frac{35}{25} \right] = 0,344 \rightarrow$$

$$l_{v0} = 0,344 \cdot 25 \cdot \frac{435}{\sqrt{15}} = 966 \text{ mm}$$

$$l_{vr} = \frac{\sigma_{sd}}{f_s} \cdot l_v \leq \frac{l_v}{5} = 193 \text{ en } \leq 70 \text{ mm}$$

$$l_{vr} = \frac{2984}{3430} \cdot 966 = 840 \text{ mm}$$

$$l_2 \leq \frac{f'_b}{150} \cdot \frac{r}{\varnothing_k} \cdot l_v = \frac{15}{150} \cdot 5 \cdot 966 = 483 \text{ mm}$$

Voor l_2 mag geen grotere waarde in rekening worden gebracht dan 483 mm. Totaal moet in een verankeringslengte $l_{vr} = 840$ mm worden voorzien, hetgeen betekent dat l_1 ten minste $840 - 483 = 357$ mm moet bedragen.

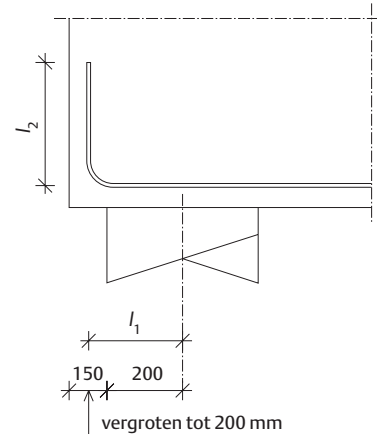
$$l_1 = 150 + 200 - 35 = 315 \text{ mm} < 357 \text{ mm.}$$

De verankeringslengte van de staaf voldoet niet.

Maatregelen:

- óf de staalspanning verlagen door aanbrengen van meer wapeningsstaal;
- óf een kleinere kenmiddellijn van de hoofdwapening toepassen;
- óf de betonsterkteklasse verhogen;
- óf de poer 2 x 50 mm langer maken.

Gekozen wordt voor de laatste optie (fig. 10):



Figuur 10

$$l_1 + l_2 = 365 + 483 = 848 \text{ mm} > 840 \text{ mm.}$$

Dwarskrachtwapening

Bepaling schuifspanning volgens VBC 8.2.2

$$\tau_d = V_d / bd = 1350 \cdot 10^3 / 600 \cdot 800 = 2,81 \text{ N/mm}^2$$

gedrongen ligger volgens 8.1.4: $d = h$

Bepaling uiterst opneembare schuifspanning volgens VBC 8.2.3

$$\tau_1 = 0,4 f_b k_\lambda k_h \sqrt{\omega_0} \leq 0,4 f_b$$

$$\lambda_v = \frac{M_{d,max}}{d \cdot V_{d,max}} = \frac{675}{0,8 \cdot 1350} = 0,625$$

$$\lambda_v > 0,6: g_\lambda = 1 + 0,625^2 = 1,39$$

$$A_0 \triangleright \text{oppervlak lastvlak} \triangleright \text{oppervlak ondersteuning} \triangleright b \cdot d$$

$$A_0 \triangleright 450 \cdot 450 \triangleright 400 \cdot 400 \triangleright 600 \cdot 800$$

$$A_0 = 400 \cdot 400$$

$$k_\lambda = \frac{12 \sqrt[3]{A_0}}{g_\lambda b d} = \frac{12 \sqrt[3]{400 \cdot 400}}{1,39 \sqrt[3]{600 \cdot 800}} = 6,0$$

$$k_h = 1,6 - h \leq 1,0$$

$$= 1,6 - 0,8 = 0,8 \rightarrow k_h = 1,0$$

$$\omega_0 = 100 \frac{A_s}{bd} = 100 \cdot \frac{3430}{600 \cdot 800} = 0,72 \%$$

$$\omega_{0,max} = 2,0\%$$

$$\omega_{0,min} = 0,7 - 0,5 \lambda_v = 0,7 - 0,5 \cdot 0,625 = 0,39\%$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0,4 \cdot 1,15 \cdot 6,0 \cdot 1,0 \sqrt[3]{0,72} \\ &= 2,47 \text{ N/mm}^2 \leq 0,4 \cdot 1,15 = 0,46 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Bepaling maximaal toelaatbare schuifspanning volgens VBC 8.2.1

$$\tau_2 = 0,2 f_b k_n k_\theta$$

$$k_n = \frac{5}{3} \left[1 - \frac{\sigma'_{bmd}}{f_b} \right] \geq 1,0$$

$$k_n = \frac{5}{3} \rightarrow k_n = 1$$

$$k_\theta = 1 \text{ voor } \alpha = 90^\circ.$$

$$\tau_2 = 0,2 \cdot 15,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 3,0 \text{ N/mm}^2$$

Door de wapening opneembare schuifspanning volgens VBC 8.2.4

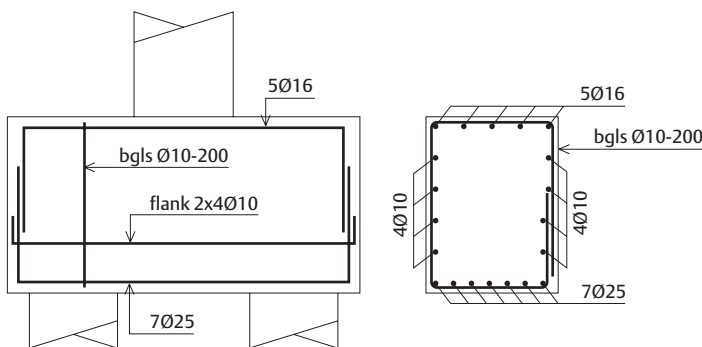
$$\tau_d = 2,81 > \tau_1 = 2,47 \text{ N/mm}^2 \text{ dus is dwarskrachtwapening noodzakelijk}$$

$$\tau_d = 2,81 < \tau_2 = 3,0 \text{ N/mm}^2 \text{ de drukdiagonaal bezwijkt niet}$$

$$\tau_{s,ben} = \tau_d - \tau_1 = 2,81 - 2,47 = 0,34 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} A_{sv} &= \frac{\tau_s b d}{z f_s \sin \alpha (\cot \theta + \cot \alpha)} \\ &= \frac{0,34 \cdot 600 \cdot 800}{520 \cdot 435 \cdot 1(0,50/0,52 + 0)} \\ &= 0,75 \text{ mm}^2/\text{mm} = 750 \text{ mm}^2/\text{m} \end{aligned}$$

Mogelijk zijn: beugels Ø12-300 = 753 mm²/m of



Ø10-200 = 785 mm²/m
 Gekozen wordt Ø10-200 (fig. 11).

Horizontale wapening volgens VBC 8.2.4 b en d

$$\lambda_v = 0,625 > 0,4$$

De berekende dwarskrachtwapening zowel verticaal als horizontaal aanbrengen.

Horizontaal: óók 750 mm²/m aanbrengen over de hoogte z. Kies praktisch voor het aanbrengen van de wapening over de volledige hoogte.

$$\begin{aligned} \text{Neem } 2 \times 4 \text{ Ø10 flankwapening} &= 2 \times 314 \text{ mm}^2 \\ &= 785 \text{ mm}^2/\text{m}. \end{aligned}$$

Detailleringsregels volgens

VBC 9.10 en 9.11

9.10.1 - Onderwapening

De vrije ruimte tussen de staven van de onderwapening bedraagt:

$$(600 - 2 \times 35 - 2 \times 10 - 7 \times 25) : 6 = 56 \text{ mm}$$

9.11.4.2 - Flankstaven

$$10\% \text{ van de hoofdbuigwapening} = 0,1 \times 2984 = 298 \text{ mm}^2 \text{ per zijvlak.}$$

De eerder aangegeven flankwapening (314 mm²) is maatgevend.

9.11.4.4 - Beugelafstand in lengterichting

h.o.h.-afstand maximaal 300 mm;
 beugels Ø10-200 voldoen.

9.11.4.5 - Beugelafstand in breedterichting

Tussenafstand van de beugels:
 $600 - 2 \times 35 - 2 \times 5 = 520 \text{ mm} < 750 \text{ mm};$
 Dubbelsnedige beugels voldoen. ■

Literatuur

1. Vis, W.C. en R. Sagel, Constructief ontwerpen in beton CB 24. Stichting ENCI Media, 's-Hertogenbosch, 2001.
2. De VBC in de praktijk. Betonvereniging, 1995.
3. NEN 6720:1995 met A2:2001, Voorschriften Beton TGB 1990 - Constructieve eisen en rekenmethoden (VBC 1995).

Figuur 11